

WYKORZYSTANIE TECHNIK SYMULACYJNYCH DO BIEŻĄCEJ OPTYMALIZACJI EKSPLOATACJI WĘGLA BRUNATNEGO W HORYZONCIE DŁUGOTERMINOWYM

THE USE OF SIMULATION TECHNIQUES FOR ONGOING OPTIMIZATION OF BROWN COAL EXPLOITATION IN THE LONG-TERM HORIZON

Corinna Minnecker, Joerg Benndorf – TU Bergakademie Freiberg, Niemcy
Wojciech Naworyta, Mateusz Sikora – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Przedstawiono model optymalizacji sekwencji wydobywania węgla brunatnego z uwzględnieniem niepewności wynikającej z niedostatków rozpoznania złoża. Przedstawiono algorytm optymalizacyjny oparty o kryteria ilości wydobytego węgla oraz jego jakości. Omówiono warunki brzegowe wynikające ze specyfiki eksploatacji węgla brunatnego w systemie ciągłym. Metoda została zweryfikowana na modelu rzeczywistej kopalni w środkowych Niemczech. Przedstawiono wyniki testu metody z uwzględnieniem wykorzystania czasu pracy koparek oraz osiągnięcia założonych celów eksploatacyjnych. Problem omówiony w artykule jest wybranym elementem projektu RTRO-Coal współfinansowanego ze środków UE w latach 2013-2017. W Raportie końcowym opublikowanym w wydawnictwie Komisji Europejskiej przedstawiono wszystkie opracowane elementy projektu RTRO-Coal (Buxton i in. 2019).

Słowa kluczowe: optymalizacja eksploatacji, węgiel brunatny, symulacja

The model of optimization of lignite mining sequences is presented, taking into account the uncertainty resulting from deficiencies in the identification of the deposit. An optimization algorithm based on the criteria for the quantity of coal extracted and its quality has been presented. The boundary conditions resulting from the specificity of brown coal mining in the continuous mining system are discussed. The method was verified on the model of a real mine in central Germany. The results of the test of the method are presented, taking into account the use of working time of excavators and the achievement of the assumed exploitation goals. The problem discussed in the paper is one selected part of the RTRO-Coal project co-financed from EU funds in 2013-2017. The final report published in the European Commission's Publication Office presents all elaborated elements of the project RTRO-Coal (Buxton et al. 2019).

Keywords: operation optimization, lignite, simulation

Wstęp

Czynniki determinujące eksploatację w kopalniach odkrywkowych nigdy nie są w pełni rozpoznane. Pierwszym i podstawowym jest naturalna zmienność parametrów złoża. W trakcie eksploatacji ujawniają się pewne zjawiska, które wymagają podejmowania szybkich decyzji w celu utrzymania wydajności maszyn podstawowych, optymalnego ich wykorzystania oraz utrzymania żądanej jakości strumienia urabianej kopaliny. Ze względu na wielość zmiennych wpływających na decyzje operacyjne oraz ilość pozyskiwanych w trakcie eksploatacji danych, podejmowanie optymalnych decyzji w krótkim czasie nie jest możliwe bez wsparcia informatycznego.

Artykuł prezentuje jeden z etapów prac wykonanych w ramach projektu RTRO-Coal, odnoszący się do planowania długoterminowego. Projekt RTRO-Coal realizowany był w latach 2013-2017 przez konsorcjum złożone z przedstawicieli uczelni: TU Delft z Holandii, TU Bergakademie Freiberg z Niemiec, AGH w Krakowie oraz niemieckich koncernów eksploatujących węgiel

brunatny RWE Power oraz MIBRAG. Koncepcja RTRO-Coal opiera się na idei bieżącej aktualizacji modelu złoża wykonywanej w oparciu o informacje pozyskiwane w procesie bieżącej eksploatacji (Benndorf i in. [2], 2015, Buxton i in. 2019 [3]). Główne elementy koncepcji RTRO-Coal bazują na metodach pomiaru oraz technikach symulacyjnych, które zostały zastosowane do modelowania złoża oraz do symulacji funkcjonowania kopalni w dążeniu do wspierania optymalnych decyzji w celu: optymalizacji alokacji sprzętu, minimalizacji przestojów maszyn podstawowych oraz uzyskania pożądanych parametrów surowca.

W artykule przedstawiono tylko jeden z wypracowanych elementów składowych projektu – metodę optymalizacji sekwencji wydobywania w procesie planowania długoterminowego. Wszystkie opracowane elementy projektu RTRO-Coal zostały przedstawione w raporcie końcowym opublikowanym przez wydawnictwo Komisji Europejskiej w 2019 r. Publikacja będąca sprawozdaniem z projektu współfinansowanego ze środków publicznych udostępniona została bez ograniczeń na stronach Komisji Europejskiej (Buxton i in. 2019 [3]).

Idea i algorytm optymalizacji planowania długoterminowego dla kopalń węgla brunatnego

Problem optymalizacji w eksploatacji węgla brunatnego polega na podjęciu najlepszych decyzji odnoszących się do sekwencji wydobywania poszczególnych partii złoża przy uwzględnieniu zmienności jego parametrów. Celem jest maksymalizacja ogólnej wartości pieniężnej eksploatacji przy jednoczesnym spełnieniu celów produkcyjnych i przestrzeganiu ograniczeń środowiskowych i operacyjnych. W tym celu zaprojektowano liniową funkcję celu, która określa osiągnięcie celów dla zdefiniowanego zbioru zmiennych decyzyjnych. W funkcji zastosowano ograniczenia, które opisują warunki brzegowe, takie jak dolna i górna granica wydajności koparek oraz ograniczenia przestrzenne samej eksploatacji. W modelu matematycznym ograniczenia są reprezentowane przez zestaw równań i nierówności.

Zaproponowany w artykule model opiera się na osiągnięciach w dziedzinie optymalizacji eksploatacji stosowanych w kopalniach węgla brunatnego (Benndorf, Dimitrakopoulos, 2013 [2], Dimitrakopoulos, Ramazan, 2004 [4], Kawalec, Specylak, 2000 [8]). W pracach wykorzystano efekty wcześniejszych badań wykonanych w ramach projektu „ibi” (John i in., 2014 [6]). Metoda została rozszerzona poprzez uwzględnienie niepewności geologicznej w opisie złoża. W tym celu zastosowano modele złoża wykonane metodą symulacji warunkowej Gaussa w programie S-GeMS (Matheron, 1073 [9], Journel, Huijbregts, 1978 [7]).

Funkcja celu i zmienne decyzyjne

Funkcja celu została tak zdefiniowana, aby minimalizować odstępstwa od celów produkcyjnych (Δ_p^t), przy maksymalizacji oczekiwanej wartości bieżącej netto (NPV) z uwzględnieniem ograniczeń wynikających z projektu górniczego. Celami produkcyjnymi są ilość węgla oraz parametry opisujące jego jakość, dlatego jednostki odstępstw od celów są odpowiednie do opisywanych cech tj. Mg, %, kJ/kg. Równanie (1) przedstawia podstawowe elementy funkcji celu.

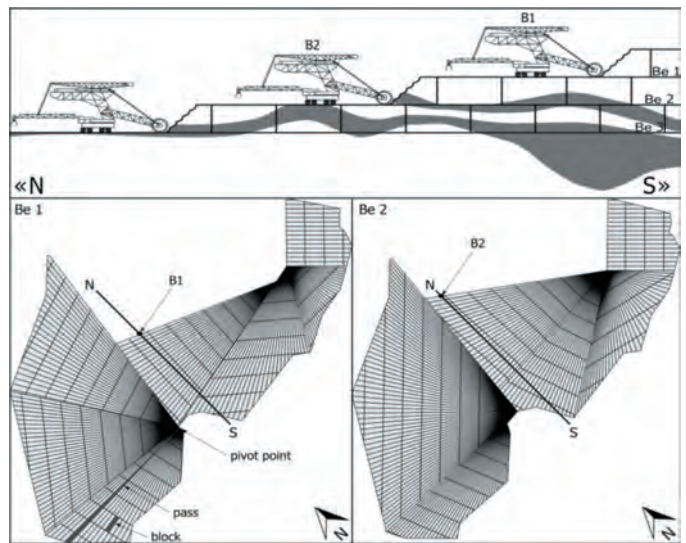
$$NPV = \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \left[w_{op} \cdot \Delta_{op}^t + \sum_{r=1}^R \sum_{e=1}^E w_{qpe} \cdot \Delta_{qpr}^t(e) \right] \rightarrow \max \quad (1)$$

Parametr T jest liczbą okresów (miesiące lub lata), P oznacza liczbę różnych produktów węglowych, takich jak pył węglowy lub węgiel energetyczny. Wielkość E przedstawia różne parametry jakościowe węgla, tj. wartość opałowa, zawartość popiołu lub zawartość siarki. Wielkości W_{op} i W_{qpe} są współczynnikami wagowymi dla każdego z celów. Wagi te, wyrażone w jednostkach EUR/tys. Mg w odniesieniu do parametru wydobytej masy, albo EUR/% w odniesieniu do parametrów jakościowych (np. popielności węgla), można interpretować jako koszty związane z odchyleniami od celów produkcyjnych. Przyjęcie ich na pewnych poziomach umożliwia sterowanie priorytetami celu np. spełnienia kryterium ilości albo jakości wydobytego węgla. Przez sumowanie wszystkich ważonych odchyłek od założonych celów produkcyjnych dla zestawu symulowanych modeli złoża węgla R uwzględnia się niepewność geologiczną złoża wynikającą z niedostatecznego rozpoznania. Niepewność ta

ujawnia się w różnicach zmienności parametrów pomiędzy poszczególnymi realizacjami R tego samego złoża.

Punktem wyjścia do optymalizacji planowania kopalni jest model blokowy złoża, który reprezentuje geometrię narzuconą przez projekt eksploatacji (rys. 1). Do każdego bloku złoża przypisano atrybuty, tj.: masa węgla, ilość nadkładu oraz parametry jakościowe wygenerowane w procesie symulacji geostatystycznej.

Podział złoża na bloki wydobywcze jest zgodny z uwarunkowaniami projektowymi, którymi są: granice eksploatacji złoża, liczba i wysokość pięter eksploatacyjnych, parametry maszyn. Położenie przestrzenne każdego bloku jest jednoznacznie identyfikowane za pomocą trzech indeksów: $i \in I$ określa poziom roboczy, na którym



Rys. 1. Reprezentacja modelu blokowego dostosowanego do zastosowanej technologii eksploatacji; u góry: pionowy przekrój przez odkrywkową kopalnię z oznakowaniem trzech pierwszych pięter eksploatacyjnych (Be) i postępów eksploatacyjnych; dół: ilustracja pierwszych dwóch pięter eksploatacyjnych (z podziałem na postępy i bloki) (John i in., 2014 [6])

Fig. 1. Representation of the block model adapted to the exploitation technology used; top: vertical section of the open-pit mine with marking of the first three exploitation floors (Be) and exploitation progress; bottom: illustration of the first two operating floors (broken down by progress and blocks) (John et al., 2014 [6])

zlokalizowany jest blok eksploatacyjny, $j \in J_i$ reprezentuje zabierkę na określonym poziomie roboczym i , $k \in K_{ij} = \{1, 2, \dots, K_{max,ij}\}$ definiuje lokalizację bloku eksploatacyjnego w zabierce j na poziomie i .

W modelu optymalizacyjnym do każdego bloku ijk i okresu produkcyjnego t przypisywana jest zmienna decyzyjna y_{ijk}^t , która przyjmuje wartości 1 albo 0. Rozwiązaniem problemu optymalizacyjnego jest optymalna kolejność eksploatacji bloków.

Jeśli zmiennej y_{ijk}^t do bloku ijk zostanie przypisana wartość 1, to blok ten zostanie eksploatowany w czasie t . Dodatkowo, zmienna decyzyjna x_{ijkp}^t jest przypisywana do każdego bloku ijk , okresu produkcji t i produktu p , która może przyjmować wartości z przedziału od 0 do 1. Ta zmienna definiuje udział określonego produktu dla każdego bloku w danym okresie czasu. W ten sposób modelowany jest proces homogenizacji, który umożliwia mieszanie kopaliny z różnych części złoża w celu spełnienia wymagań jakości węgla pod kątem różnych produktów.

W funkcji celu istotne jest zdefiniowanie odchyłek od

celów produkcyjnych dla każdej analizowanej realizacji R złoża. Przyjęto, że odchylenia od zakładanej wielkości wydobywania Δb_p albo odchylenia od dopuszczalnych wartości parametrów jakościowych $\Delta b_p(e)$ będą przedmiotem kar finansowych. W przypadku kryterium ilości funkcja celu uwzględni obydwa odstępstwa – zarówno niedobór jak i nadmiar wydobytego węgla jako sytuacje niekorzystne. O ile niedostateczna ilość wydobytego węgla to sytuacja dla kopalni w sposób oczywisty niekorzystna, to jednak penalizacja nadprodukcji może budzić pewne wątpliwości. Chodzi o to, aby w procesie optymalizacji uwzględnić również ograniczoną zdolność do magazynowania węgla na placu homogenizacyjnym oraz związane z tym koszty.

Odchylenia od przyjętych poziomów jakości węgla $\Delta b_p(e)$ w funkcji celu traktowane są w podobny sposób. Tu brane są pod uwagę dolne i górne granice głównych parametrów jakościowych węgla, które reprezentują maksymalną szerokość pasma tolerancji parametrów jakościowych wymaganych przez elektrownię. Przekroczenie tych progów jest karane. Odchylenia od celów produkcyjnych w zakresie jakości przyjmują wartość zero, jeżeli parametry jakościowe mieszczą się w zdefiniowanych granicach.

Warunki brzegowe

W modelu optymalizacyjnym przyjęto warunki brzegowe wynikające ze specyfiki kopalni węgla brunatnego. Ilość materiału wydobywanego na jednym piętrze eksploatacyjnym i w określonym okresie czasu została ograniczona zdefiniowaną wydajnością maszyn podstawowych. System eksploatacji z transportem taśmowym wyznacza dodatkowe ograniczenie. Dopiero po ukończeniu całej zabierki przenośnik taśmowy może zostać przesunięty. W przypadku modelu optymalizacyjnego oznacza to, że wszystkie bloki w jednej zabierce muszą zostać wyeksploatowane, zanim bloki kolejnej zabierki będą mogły zostać zaplanowane do wydobywania. Kolejnym warunkiem jest utrzymanie bezpiecznej odległości d od krawędzi eksploatowanego piętra niżej ległego. Ten geometryczny i czasowo niezależny problem został zilustrowany na rysunku 2.

Model optymalizacyjny został wypróbowany na przykładzie wielopokładowego złoża węgla brunatnego w środkowych Niemczech. Model blokowy złoża został opracowany w ramach projektu „ibi” (John i in., 2014 [6]); stanowił on dobrą bazę do walidacji algorytmu optymalizacyjnego.

Parametry modelu optymalizacyjnego

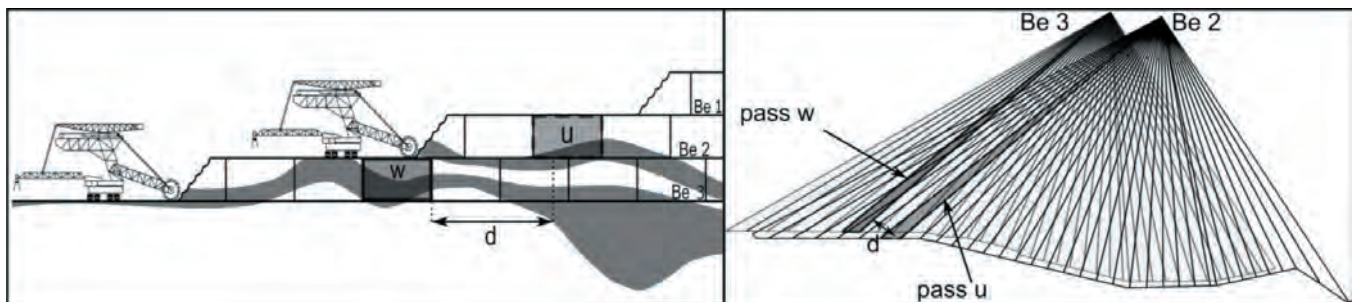
W kopalni planuje się eksploatację na pięciu poziomach w trzech okresach. Zaplanowano wydobywanie 18 mln Mg węgla, na co składają się dwa rodzaje produktów $T1$ i $T2$ w stosunku 70:30. $T1$ to klasa wyższa określona przez mniejszą tolerancję wahań parametrów jakościowych. Jego cena podstawowa wynosi 130% ceny podstawowej ceny węgla $T2$. Typy węgla są określone przez cztery parametry jakościowe, a mianowicie wartość kaloryczną, zawartość popiołu, zawartość siarki oraz zawartość tlenku żelaza w popiele oraz górną i dolną granicę każdego z wymienionych parametrów. Dla parametrów jakościowych redukcję oraz przyrost zysków zdefiniowano jako funkcję ich aktualnie eksploatowanych wartości.

Aby zróżnicować kary za przekroczenie lub zaniżenie ilości produkowanego węgla, stosuje się współczynnik 30 w stosunku do kar za przekroczenie parametrów jakościowych. W wyniku tego zabiegu cel ilościowy uzyskał wyższy priorytet. W ten sposób zabezpieczono model optymalizacyjny przed planowaniem produkcji węgla o wyższej jakości, ale w niewystarczającej ilości. Założono, że koszty wydobywania i produkcji obu rodzajów węgla są takie same i wynoszą 1,2 EUR/t. Cena bazowa węgla $T1$ to 24 EUR/t a $T2$ tylko 18 EUR/t przy wymaganej wielkości wydobywania węgla $T1$ na poziomie 12,6 mln t/a, a $T2$ 5,4 mln t/a. Koszt zdejmowania nadkładu przyjęto w wysokości 1,8 EUR/m³. W celu obliczenia wartości netto założono współczynnik dyskonta na poziomie 10%. W tabeli 1 zestawiono parametry koparek na poszczególnych poziomach wraz z rocznym czasem pracy. Wielkości V_{io}^t i V_{iw}^t reprezentują zdolności sprzętu do wydobywania węgla brunatnego W lub zdejmowania nadkładu O na poziomie wydobywczym i .

Model optymalizacyjny oparty na kryterium ilości kopaliny różni się od modelu opartego na kryterium jakości węgla. Nie uwzględnia wszystkich ograniczeń związanych z jakością węgla. Jeśli przyjmuje się, że w złożu jest tylko jeden typ węgla to do modelu wprowadza się mniej zmiennych decyzyjnych. Wtedy funkcja celu nakłada kary tylko za niespełnienie wymagań ilościowych.

Wyniki i dyskusja

Rozwiązanie problemu optymalizacji w programie CPLEX na czterordzeniowym procesorze PC (3,3 GHz) zajęło około 24 sekundy w przypadku modelu ilościowego oraz 1 godzinę



Rys. 2. Ilustracja minimalnego wyprzedzenia frontów eksploatacyjnych (d) w zależności od szerokości zabierek (u , w) na sąsiadujących piętrach (Be 2, Be 3), (John i in., 2014 [6])

Fig. 2. Illustration of the minimum advance of exploitation fronts (d) depending on the width of the mining blocks (u , w) on adjacent benches (Be 2, Be 3), (John et al., 2014 [6])

Tab. 1. Czas pracy oraz wydajności maszyn na poziomach eksploatacyjnych modelu optymalizacyjnego
 Tab. 1. Working time and performance of machines at the operational levels of the optimization model

Poziom	Czas [h/a]	V'_{hw} [m ³ /h]	V'_{io} [m ³ /h]
1	5400	6150	5000
2	4900	3450	2300
3	5200	2500	2100
4	4600	1500	1500
5	4600	1250	1250

w modelu jakościowym. Aby ocenić otrzymane wyniki, nie wystarczy wyłącznie porównać rentowność mierzoną przez pryzmat NPV każdego modelu. Należy zwrócić uwagę, że przedstawione modele kopalni są w dużej mierze uproszczone, idealistyczne. Nie obejmują całego obszaru złoża. W rzeczywistości, w pełnym okresie eksploatacji złoża, występują różne ilości kopaliny oraz odpowiadające im różne ilości mas nadkładowych, które należy urobić, aby wybrać poszczególne bloki złoża. Inne też są kubatury nadkładu wewnątrz złoża, a inne przy jego granicach. Ponadto w całym okresie funkcjonowania kopalni występują uwarunkowania, które wpływają na eksploatację, a nie zawsze mają wpływ na NPV.

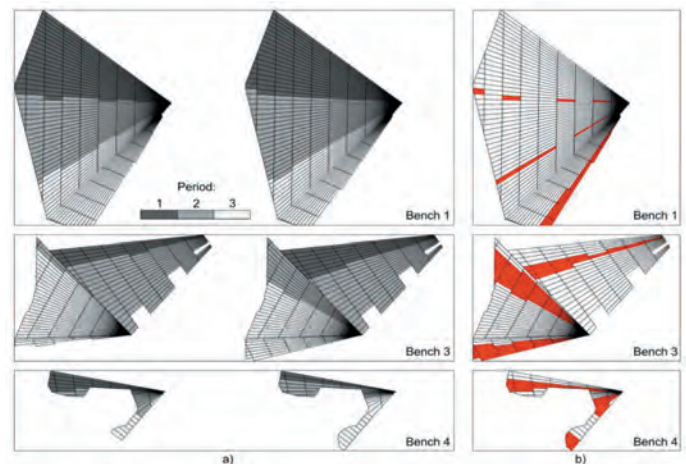
Rysunek 3 przedstawia planowane sekwencje wydobywania na poszczególnych poziomach eksploatacyjnych, które zostały wyznaczone za pomocą modelu optymalizacyjnego. W przypadku modelu opartego na jakości węgla wybrany czynnik dyskontowy determinuje usuwanie nadkładu z dna złoża najpóźniej jak to tylko możliwe. Pierwszy poziom eksploatacyjny ma mniej korzystny stosunek nadkładu do węgla, niż poziomy niższe. W związku z tym postęp na tym poziomie jest mniejszy, niż w przypadku modelu opartego na ilości węgla, a do osiągnięcia żądanych ilości większą ilość węgla wydobywa się na poziomach niższych (2-5). Fakt, że na ostatnich dwóch poziomach występuje węgiel o wyższej jakości wzmacnia ten efekt. Na przykład, dodatkowe wydobywanie bloków na poziomie czwartym poprawia znacznie parametr wartości opałowej. Jednak zdefiniowane wydajności koparek (tab. 1) oraz minimalne odstępstwa między sąsiadującymi frontami eksploatacyjnymi d ograniczają postęp tych dwóch pięter, co jest również zilustrowane na rysunku 3.

Na rysunku 4 przedstawiono wykorzystanie sprzętu na poziomach eksploatacyjnych dla dwóch rodzajów modelu optymalizacyjnego. W obydwu przypadkach występują niewielkie różnice, jednak nieznacznie lepsze wskaźniki wykorzystania sprzętu otrzymano w modelu opartym na kryterium jakości węgla.

Na rysunku 5 pokazano kształtowanie się dwóch parametrów jakościowych w trzech okresach eksploatacji i dwóch modelach optymalizacji. W przypadku zawartości popiołu i siarki w węglu typu T2 odchylenia od wartości docelowej są mniejsze dla modelu opartego na kryterium jakości węgla. Zawartość tlenu żelaza w popiele w modelu opartym na kryterium ilościowym przekracza górną granicę w okresie 3; zjawisko to nie występuje w modelu opartym na kryterium jakości węgla. Można stwierdzić, że wyniki modelu optymalizacji sekwencji wydobywania opartego na kryterium jakości węgla są korzystniejsze niż plany eksploatacji oparte tylko na kryterium ilościowym.

Podsumowanie

Przedstawiony w artykule model optymalizacji został wykorzystany w kolejnych etapach projektu, między innymi do opty-



Rys. 3. a) Wyznaczenie bloków poszczególnych pięter wydobywczych planowanych do eksploatacji w założonym okresie czasu (po lewej: model ilościowy; po prawej: model oparty na jakości węgla)

b) Różnice pomiędzy dwoma planami eksploatacji według różnych kryteriów. Bloki planowane do wydobywania w różnych okresach zostały zabarwione na czerwono

Fig. 3. a) Designation of blocks of individual mining benches planned for operation in the assumed period of time (on the left: quantitative model; on the right: model based on coal quality)

b) Differences between two exploitation plans according to different criteria. Blocks planned for extraction at various times have been colored red

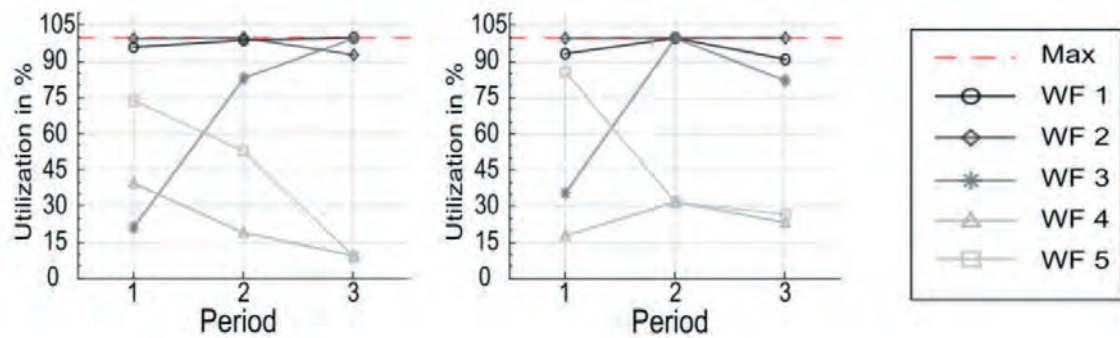
malizacji eksploatacji w horyzoncie krótkoterminowym. Program został przetestowany również w warunkach polskiego złoża węgla brunatnego Gubin. Zaproponowana metoda z wykorzystaniem technik symulacyjnych, zarówno do funkcjonowania kopalni jak i do modelowania złoża z uwzględnieniem niepewności jego rozpoznania, umożliwiła poprawę funkcjonowania kopalni, co zostało przetestowane pod kątem korzyści ekonomicznych.

Cała koncepcja oraz wszystkie opracowane elementy projektu RTRO-Coal zostały przedstawione w raporcie końcowym opublikowanym przez wydawnictwo Komisji Europejskiej w 2019 r. (Buxton i in., 2019 [3]).

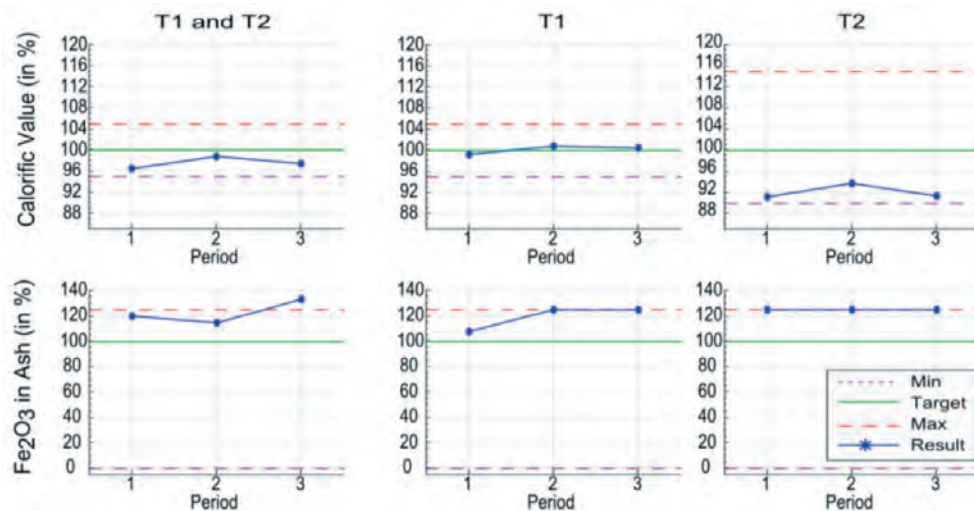
Metoda, po odpowiedniej modyfikacji, może znaleźć zastosowanie również w innych kopalniach, w których konieczne jest sterowanie strugą urobku z uwzględnieniem zmienności parametrów złoża i niepewności ich rozpoznania np. w cementowniach, w kopalniach wapienia dla przemysłu wapienniczego i in.

Projekt RTRO-Coal był współfinansowany ze środków Unii Europejskiej Funduszu Węgla i Stali (Research Fund for Coal and Steel), numer grantu RFCR-CT-2013-00003.

Praca naukowa polskiego zespołu projektu RTRO-Coal była finansowana ze środków finansowych na naukę w latach 2014-2017 przyznanych na realizację projektu międzynarodowego współfinansowanego.



Rys. 4. Wykorzystanie sprzętu na poziomach eksploatacyjnych dla zdefiniowanych parametrów modelu; z lewej: model oparty na kryterium ilościowym; z prawej: model oparty na kryterium jakości węgla
 Fig. 4. The use of equipment at operating benches for defined model parameters; on the left: a model based on a quantitative criterion; right: a model based on the coal quality criterion



Rys. 5. Prognozowana jakość węgla w oparciu o zdefiniowane wartości docelowe dla dwóch parametrów jakościowych; kolumna 1: model ilościowy; kolumna 2 i 3: model jakościowy
 Fig. 5. Forecast coal quality based on defined target values for two quality parameters; column 1: quantitative model; columns 2 and 3: qualitative model

Literatura

- [1] Benndorf J. (i in.), (2015): *RTRO-Coal: Real-Time Resource-Reconciliation and Optimization for exploitation of coal deposits*, Minerals, 2015, vol. 5, iss. 3, s. 546-569
- [2] Benndorf, J., and Dimitrakopoulos, R.: *Stochastic long-term production scheduling of iron ore deposits: Integrating joint multi-element geological uncertainty*, Journal of Mining Science 49.1 (2013), s. 68-81
- [3] Buxton M., Benndorf J., Donner R., Naworyta W., Lohsträter O., Lindig M., Rosenberg H., Asmus S. (2019): *Real-time reconciliation and optimization in large open pit coal mines: (RTRO-Coal) : final report*, European Commission. Research Found for Coal and Steel. — Luxembourg : Publications Office of the European Union, DOI 10.2777/61704
- [4] Dimitrakopoulos, R., Ramazan, S., 2004, *Uncertainty based production scheduling in open pit mines*, SME Transactions, vol. 316, s. 106-112
- [5] Hustrulid, W., and Kuchta, M., 1995, *Open pit mine planning and design*, Volume 1 – fundamentals: A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands
- [6] John, A., Minnecker, C. and Donner, R. 2014. „*Innovative Braunkohlen-Integration in Mitteldeutschland -ibi*“. *Schlussbericht Verbundprojekt VPI: „Integriertes Lagerstättenmanagement*“, TU Freiberg, BMBF
- [7] Journel, A. G., and C. J. Huijbregts, 1978, *Mining geostatistics*, Academic Press, London
- [8] Kawalec, W., and Specylak, J., 2000, *Open pit optimisation of a lignite deposit*, in Panagiotou and Michalakopoulos, eds., Mine Planning and Equipment Selection 2000: Balkema, Rotterdam, The Netherlands, s. 217-222
- [9] Matheron, G., 1973, *The intrinsic random functions and their application: Advances in Applied Probability*, v. 5, s. 439-468